

# 管廊工程对周围水源热泵回灌影响 效应分析与应用

潘俊,陈岩岩,杜晓宇

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 探索管廊工程对地下水流场及附近地下水源热泵回灌效率的影响。  
**方法** 通过室内试验模拟管廊工程对不同回灌水温条件下不同距离时回灌水位的变化,并绘制出水位变化图。应用等效渗透系数对中国医科大学附属盛京医院水源热泵工程回水井影响进行分析和计算。**结果** 管廊工程的存在相当于改变了其所在段的含水层渗透系数,通过计算得到属盛京医院管廊工程的等效渗透系数  $K_{5,6} = 0.227K_1$ ,并利用等效渗透系数计算回灌量,提供合理的布井空间。**结论** 管廊工程对地下水渗流场会产生阻挡效果,造成构筑物迎水面水位壅高和背水面水位下降,地下水流通过构筑物顶部和底部发生了绕流。

**关键词** 水源热泵;管廊工程;等效渗透系数;合理布井;绕流

中图分类号 TU529

文献标志码 A

## Effect of Pipe Gallery Project on Recirculation of Its Surrounding Water Source Heat Pump and Application

PAN Jun, CHEN Yanyan, DU Xiaoyu

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** To explore the influence of pipe gallery project on groundwater flow field and nearby groundwater source heat pump recirculation efficiency, indoor tests of groundwater source heat pump recirculation nearby pipe gallery project are carried out under different recharge water temperature. Water level change is investigated at different distances. Characteristic of recharge well at Shengjing hospital affiliated to China Medical University is studied by the equivalent permeability coefficient. The recharge amount is calculated to provide a reasonable well space using the equivalent permeability coefficient. The equivalent permeability coefficient  $K_{5,6}$  with the existence of the pipe gallery project at Shengjing hospital is equal to  $0.227K_1$ . The results show that the existence of the pipe gallery project is equivalent to changing the aquifer permeability

收稿日期:2019-05-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51708365)

作者简介:潘俊(1962—),男,教授,博士,主要从事水源热泵方面研究。

coefficient of the section where it is located. The pipe gallery project will have a blocking effect on the groundwater seepage field, causing the water level of the structur's waterfront to be rise and the backwater level to drop. The groundwater flow flows around the top and bottom of the structure.

**Key words:** water source heat pump; pipe gallery engineering; equivalent permeability coefficient; reasonable drainage; flow around

城市地下空间的大规模开发和利用一定程度上促进了城市的发展,改善了城市交通和资源利用状况.但同时也对地下水环境产生了一定的影响<sup>[1]</sup>.管廊工程的影响大致分为两个方面:一是构筑物施工所产生的影响<sup>[2-5]</sup>;二是构筑物建成后潜在的影响<sup>[6-10]</sup>.王婷婷<sup>[11]</sup>通过对北京地铁七号工程的分析,得出了地铁建设对地下水水位壅高的影响,从施工工艺角度出发提出减缓水位壅高的措施.成璐等<sup>[12]</sup>通过采用三维地下水流动数值模拟方法模拟成都地铁建设对地下水水位的影响,结果表明地下水水位变化主要受含水层厚度和地下水流向的影响.潘俊等<sup>[13]</sup>通过室内砂箱模拟试验分析了多工况条件下地铁工程对水源热泵渗流及温度场的影响范围,分别从地铁工程横向隔断方式和构筑物下表面相对高度差两方面着手得出地下水位和水温变化大小. P. Estanislao 等<sup>[14]</sup>建立了地下工程对地下水流场的影响模型,并定义为“屏障效应”,表明了地下工程对地下水的阻挡效应.明确地下工程对地下水水位的影响<sup>[15-17]</sup>,为实际工程的建设提供了理论依据.目前大多数研究都是针对单个地下构筑物对地下水的影响<sup>[18-19]</sup>,而考虑地下构筑物对热量运移影响的研究甚少<sup>[20]</sup>,实际工程中开展地下构筑物对地下水流和热量运移的叠加影响研究具有实际借鉴意义.笔者利用室内试验分析地下构筑物周围含水层渗透系数的变化,计算构筑物周围的等效渗透系数.并利用等效渗透系数分析沈阳市地下综合管廊南运河段工程对沈阳盛京医院水源热泵工程的影响及合理调整改造方案,以实现该水源热泵工程安全可靠的运行.

1 试 验

1.1 试验装置

试验装置由有机玻璃砂箱,供排水系统,测量系统3部分组成(见图1).

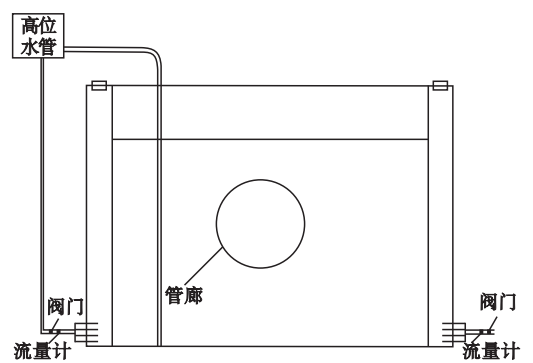


图1 试验装置图

Fig. 1 Test device diagram

(1)砂箱主体是试验装置的重要组成部分,长宽高为1.1 m×0.5 m×0.6 m的有机玻璃箱.两侧为长为0.05 m调节水室,左侧进水且与高位水箱连接.试验中用一个高为0.5 m半径为0.05 m的有机玻璃圆柱体作为管廊工程模型.砂箱底端设有12个压力检测口,用软管和带有坐标纸的测压管连接.高位水箱放置于高3.5 m的钢架上.

(2)测量系统中包括温度测量仪,温度探头以及测压管.

1.2 试验方法

由于实际水流方向为北东向西南,根据相似准则管廊工程处于水源热泵所在区域含水层内.当初始水头为50 cm时,砂箱内部流场饱和.试验分为两种工况进行.工况1:冬季采暖期回灌水温为7℃时的水位变化;工况2:夏季制冷期回灌水温为19℃的水位变

化. 每种工况分为3组试验进行,通过高位水箱接出水管回灌的方式实现. 回灌位置分别设置在左侧距管廊17 cm,34 cm,50 cm处,管廊模型左侧10 cm,20 cm,30 cm,40 cm,50 cm处对应设置1~5水位监测点;管廊模型顶部设置6~7监测点;管廊模型右侧10~50 cm处分别设置8~12水位监测点. 每组试验分别测量60 min时各个监测点水位并记录. 水位测点布置如图2所示. 为了清晰地对比有无管廊存在情况下地下水渗流场的变化规律,单独观测一组无管廊存在情况下测压管水位变化.

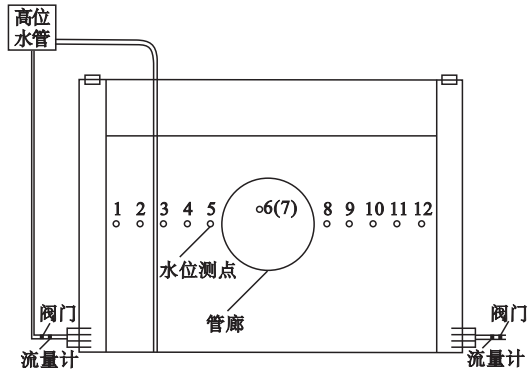


图2 水位测点布置图

Fig. 2 Water level measuring point layout

2 结果与分析

2.1 冬季采暖期回灌水温为7℃的水位变化

通过模拟冬季采暖期回灌水温为7℃时(工况1)的回灌试验,分析管廊影响下各个测点的水位变化规律,以确保水源热泵的正常运行. 采暖期回灌试验不同测点水位变化情况如图3所示. 从图3可以看出,回灌位置距离管廊17 cm时,由于管廊的阻挡作用,管廊左侧1~5测点各点水位逐渐升高,最高水位值至56.4 cm,5~6测点水位明显下降,6~7测点水位基本保持不变,8~12测点水位变化速率较为稳定,各点水位呈下降趋势. 回灌位置距管廊34 cm时,最高水位值55.5 cm. 回灌位置水位值55 cm,较无管廊回灌水位上升2 cm左右. 回灌位置距离管廊

50 cm时,测点5为水位最高点,最高水位值54.2 cm. 回灌位置水位值53.5 cm,较无管廊回灌水位上升1 cm左右.

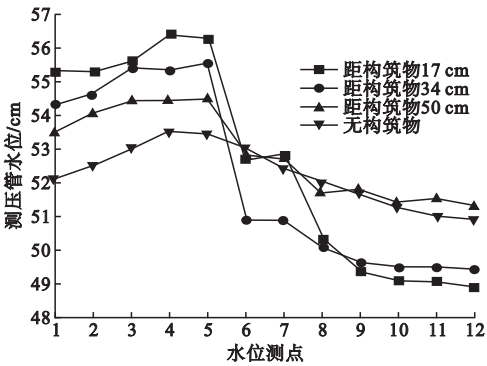


图3 采暖期回灌试验不同测点水位变化

Fig. 3 Water level change of different measuring points in recharge experiment during heating period

通过工况1的对比试验可知:管廊工程相当于一个不透水物体对地下水的阻挡作用,使得水位由进水端到出水端逐渐降低,符合地下水的运动规律. 当回灌井距离构筑物越近,阻挡效果越明显,迎水面水位测点的上升值越高,背水面水位测点下降值就越大.

2.2 夏季制冷期回灌水温为19℃的水位变化

夏季制冷期回灌水温为19℃时(工况2)不同测点水位变化如图4所示.

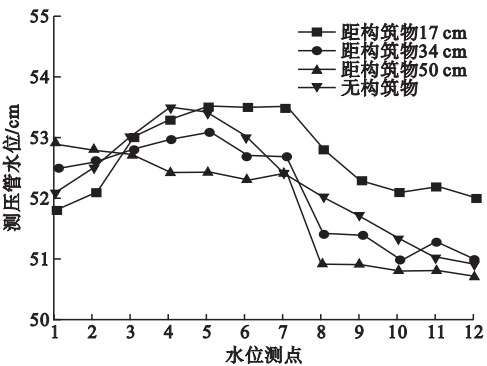


图4 制冷期回灌试验不同测点水位变化

Fig. 4 Water level change of different measuring points in recharging test during cooling period

从图4可以看出,回灌位置距离管廊17 cm时,越过管廊前各测点水位均呈上升

趋势.相同条件下相对于冬季水位变化值更小,但变化趋势基本相同.由于管廊的阻挡效果,5测点为水位最高点,最高值为53.5 cm.回灌位置水位值53 cm,较无管廊回灌水位上升1 cm左右.回灌井距离管廊34 cm时,水位最高值为53 cm.回灌位置水位值52.7 cm,较无管廊回灌水位上升0.4 cm左右.水位变化符合地下水运动规律.回灌井距离管廊50 cm时,1点为水位最高点,最高值为52.9 cm,较无管廊回灌水位上升0.4 cm左右.

通过对比工况1和工况2的试验可以发现:相同回灌水温、相同回灌位置时,回灌水温越高,越过管廊前产生的水位变化值就越小,产生的水位壅高值就越小.

### 2.3 管廊工程对含水层渗透系数的影响

实际工程中,若回灌产生的水位壅高过大,用户需水量则不能全部回灌到含水层中,导致地下水资源浪费.因此必须确保安全有效的地下水回灌空间.依据工程实际,含水层有效回灌空间是取2012年至2018年的最小水位埋深11.5 m减去地下井室埋深1.5 m和年水位变幅1.0 m,笔者取水源热泵工程回灌有效回灌空间 $h=9.0$  m.由于试验比例为1:200,所以试验条件下有效回灌空间为 $h=4.5$  cm.根据地下水达西定律可得:

$$Q = V \cdot A = K \cdot I \cdot A = K \cdot \frac{\Delta H}{L} \cdot A. \quad (1)$$

式中: $Q$ 为测定下端口的出水量; $V$ 为渗透速度,m/d; $K$ 为渗透系数,m/d; $I$ 为水力坡度; $A$ 为过水断面面积,m<sup>2</sup>; $A$ 为上下游水位差,m; $L$ 为上下游测点间的距离,m.

由式(1)可以推出渗透系数为

$$K = \frac{Q \cdot L}{\Delta H \cdot A}. \quad (2)$$

由于试验砂箱进出水端是定流量,即 $Q$ 恒定,砂箱中各区段 $A, L$ 恒定,因此定义无管廊工程自然渗流条件下各参数为 $K_1, \Delta H_1$ ,试验条件下各区段参数为: $K_{1,2}, \Delta H_{1,2}$ ,

$K_{2,3}, \Delta H_{2,3}, K_{3,4}, \Delta H_{3,4}, K_{4,5}, \Delta H_{4,5}$ ,根据式(2)得:

$$K_{a,b} = \frac{\Delta H_1}{\Delta H_{a,b}} \cdot K_1. \quad (3)$$

式中: $a, b=1, 2, 2, 3, 3, 4, 4, 5, 5, 6, a, b$ 分别代表相邻两测点; $K_1$ 为试验无管廊工程情况下的渗透系数.

选取5,6点稳定状况时进行计算通过计算求得管廊工程周围的等效回灌渗透系数为: $K_{5,6}=0.227K_1=0.227 \times 33.82=7.78$  m/d.

管廊工程的存在改变了其所在段的含水层渗透系数.利用室内试验推算管廊工程周围含水层渗透系数的变化,通过计算增加管廊工程后渗透系数的削减比例,得到一个等效渗透系数,并利用等效渗透系数计算实际单井回灌量以提供合理的布井空间.

## 3 实例应用

### 3.1 工程概况

中国医科大学附属盛京医院病房楼包括急诊妇儿教学病房楼和门诊病房楼,建筑面积为10.8万m<sup>2</sup>.该水源热泵工程最大取水量为930 m<sup>3</sup>/h,每天运行10 h,全年取水量为334.8万m<sup>3</sup>/a.工程现有27眼井,包括在鲁迅儿童公园内的4眼取水井,编号为SH1~SH4;20眼回灌井,编号为GH1~GH20.单井回灌量 $Q_g$ 为46.65 m<sup>3</sup>/h;3眼取回两用井,编号为QS1~QS3.其中QS1在鲁迅儿童公园内,QS2和QS3在盛京医院家属院区.水源热泵工程井位分布如图5所示.

沈阳市城市地下综合管廊(南运河段)地下盾构管廊开挖直径为6.2 m,管廊内径为5.4 m,每个管廊内分上、下两舱.管廊工程通过鲁迅儿童公园并需报废盛京医院地下水源热泵工程6眼井,分别为SH1、SH2、GS1、GH4、GH5、GH4.管廊工程会对盛京医院病房楼地下水源热泵工程抽回水井产生一定的影响,新建井的同时,还应考虑管廊工程建成后对地下水源热泵工程取回水井产生影

响进行适当的补偿(新建补偿井),以确保水源热泵安全可靠的运行。

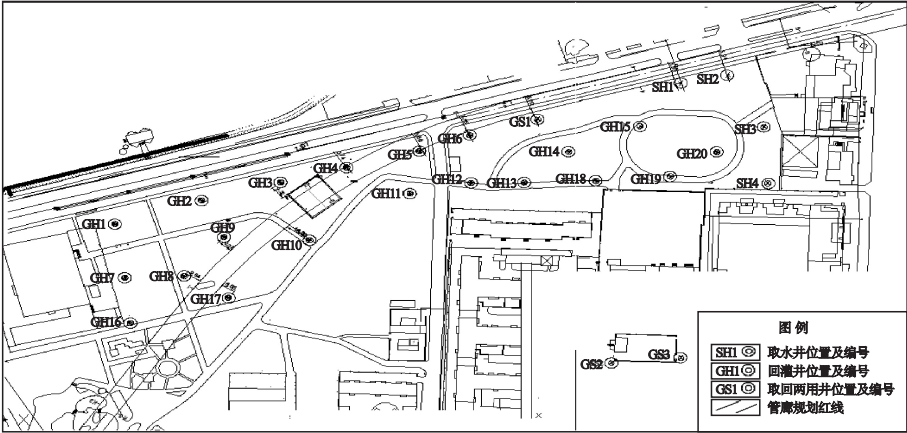


图5 水源热泵工程井位分布图

Fig. 5 Well location map of water source heat pump project

3.2 管廊工程影响下回灌井的回灌量分析

3.2.1 管廊工程影响下的单井回灌量

管廊工程的存在改变了原本的单井回灌量,通过裘布依公式计算管廊工程影响下的单井回灌量。

Q\_H = 1.336K\_H \frac{(2H - h)h}{\lg \frac{R\_H}{r\_w}} \tag{4}

式中:Q\_H 为单井回灌量;K\_H 为回灌渗透系数;H 为含水层的厚度;R\_H 为回灌影响半径;r\_w 为回水井的半径;h 为未来水位有效壅高值。

根据室内试验结果和盛京医院水源热泵工程得出:K\_H = 7.78 m/d;H = 30.43 m;R\_H = 169.38 m;r\_w = 0.265 m;h = 3.5 m;根据式(4)计算得出盛京医院水源热泵工程单井回灌量:Q\_H = 35.54 m³/h。

3.2.2 井间干扰回灌量计算

井间干扰量在考虑回灌井之间的相互影响时,还应考虑受管廊工程影响后的回灌量。受管廊工程影响后管廊附近的回灌井的实际干扰回灌量为

Q'\_g = (1 - \alpha\_s) Q\_H \tag{5}

式中:Q'\_g 为受管廊影响后的井间干扰回灌量;\alpha\_s 为井间干扰系数,取 \alpha\_s = 0.2。

根据式(5)计算盛京医院水源热泵工程

受管廊工程影响后管廊附近的回灌井的实际干扰回灌量:Q'\_g = (1 - 0.20) \times 35.54 = 28.44 m³/h。

受管廊工程影响后管廊附近回灌井的单井回灌量比现状回灌井回灌量减少量为

\Delta Q = Q\_g - Q'\_g \tag{6}

式中:\Delta Q 为受管廊影响下的回灌减少量。

根据式(6)计算得出盛京医院水源热泵工程回灌井回灌量减少量:

\Delta Q = 46.65 - 28.44 = 18.22\text{m}^3/\text{h}。

由于盛京医院水源热泵工程中管廊两侧10~20 m 回灌井数有10眼,因此这10眼回灌井受管廊工程影响总的将减少回灌量:

\sum Q = 10 \times 18.22 = 182.2 \text{ m}^3/\text{h}。

3.2.3 回灌井数的计算

受管廊工程影响后需要重新计算回灌井数,回灌井数的计算方法为

N = \frac{\sum Q}{Q\_g} \tag{7}

根据式(7)计算盛京医院水源热泵工程回灌井数。原设计单井回灌量 Q\_g 为 46.65 m³/h,减少的总回灌量 \sum Q 为 182.2 m³/h,折合需要的回灌井数为:N = 182.2/46.65 \approx 3.9,故取4眼井。因此在管廊影响下为了满足回灌量需再新建4眼回灌井。



由于管廊工程(南运河段)需要报废盛京医院地下水源热泵工程3眼回灌井GH4、GH5、GH6,受管廊影响的新建4眼补偿回灌井,合计新建7眼回灌井,另外考虑1眼回灌备用井.改建项目共需新建8眼回灌井(含1眼备用井),加上利用原有17眼回灌井,盛京医院地下水源热泵改建工程的回灌井数

为25眼.  
考虑周围水源热泵工程用户分布情况和地下水流向,将报废的回灌井GH4、GH5、GH6向南平移新建GH4、GH5、GH6回灌井;在鲁迅儿童公园南侧为补偿管廊附近受其影响的回灌量新建5眼回灌井,分别为GH21、GH22、GH23、GH24、GH25(见图6).

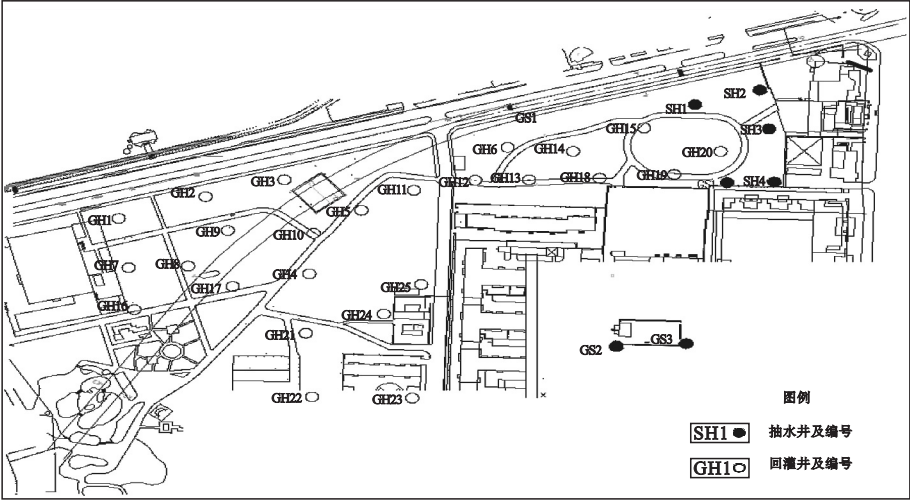


图6 回灌井布设示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the recharge well layout

4 结 论

- (1)管廊工程的存在相当于在该区域的含水层中增加了一个不透水的物体,改变了其所在段的含水层渗透系数,通过试验得到增加管廊工程后渗透系数的削减比例,利用削减比例计算一个等效渗透系数  $K_{5,6} = 0.227K_1$ .
- (2)管廊工程对地下水渗流场会产生阻挡效果,造成构筑物迎水面水位壅高和背水面水位下降,地下水流通过构筑物顶部和底部发生了绕流.
- (3)应用等效渗透系数对沈阳市城市地下综合管廊(南运河段)工程中国医科大学附属盛京医院水源热泵工程回水井影响进行分析和计算,并对回水井重新调整补建,运行一年后该水源热泵工程安全可靠.

参考文献

[1] 许劼,王国权,李晓昭.城市地下空间开发对

地下水环境影响的初步研究[J].工程地质学报,1999(1):15-19.  
(XU Jie, WANG Guoquan, LI Xiaozhao. A preliminary research on potential effect of underground engineering on groundwater environment[J]. Journal of engineering geology, 1999(1):15-19.)  
[2] 庄乾城,罗国煜,李晓昭,等.地铁建设对城市地下水环境影响的探讨[J].水文地质工程地质,2003(4):102-105.  
(ZHUANG Qiancheng, LUO Guoyu, LI Xiaozhao, et al. Influence of subway construction on the groundwater environment [J]. Hydrogeology and engineering geology, 2003(4):102-105.)  
[3] 彭泽健,钟世振,郑柱.地铁隧道涌渗水诱发地下水位变化情况及变形监测范围研究[J].交通世界,2017(14):136-138.  
(PENG Zejian, ZHONG Shizhen, ZHENG Zhu. Subway tunnel induced water seepage change caused by groundwater level and deformation monitoring range [J]. World of transportation, 2017(14):136-138.)  
[4] 胡晓.滨海城市地铁工程的地下水影响问题分析[D].成都:西南交通大学,2010.  
(HU Xiao. Analysis of impact of groundwater in coastal city subway project [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.)  
[5] 刘鑫.浅层地下水对天津地铁工程的影响研究[D].成都:西南交通大学,2015.

- (LIU Xin. Study on the influence of shallow groundwater on Tianjin metro [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. )
- [ 6 ] 李春霞. 太原市地铁2号线大南门段盾构法施工对地面及建筑物的影响研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- (LI Chunxia. Research influence on shield construction for surface and building in Dananmen section of Taiyuan metro line #2 [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. )
- [ 7 ] 陈志国. 地下水渗流对地铁车站基坑稳定性影响 [J]. 西部探矿工程, 2011, 23 (4): 10 - 14.
- (CHEN Zhiguo. Influence of groundwater seepage on foundation pit stability of metro stations [J]. West-China exploration engineering, 2011, 23 (4): 10 - 14. )
- [ 8 ] HEPBASLI A, AKDEMIR O, HANCIOGLU E. Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system [J]. Energy conversion & management, 2003, 44 (4): 527 - 548.
- [ 9 ] PAKSOY H O, ANDERSSON O, ABACI S, et al. Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in an aquifer [J]. Renewable energy, 2000, 19: 117 - 122.
- [ 10 ] 蔡伟. 地下水渗流对基坑工程稳定性的影响分析 [J]. 工程建设与设计, 2018 (12): 48 - 49.
- (CAI Wei. Analysis on the influence of groundwater seepage on the stability of foundation pit engineering [J]. Engineering construction and design, 2018 (12): 48 - 49. )
- [ 11 ] 王婷婷. 北京地铁七号线工程对城市区域地下水水位的影响浅析 [J]. 科技风, 2009 (21): 163 - 164.
- (WANG Tingting. Analysis on the effect of Beijing subway line (No. 7) project on the groundwater level of city area [J]. Science and technology, 2009 (21): 163 - 164. )
- [ 12 ] 成璐, 许模, 毛邦燕. 成都地铁2号线对地下水的影响评价 [J]. 路基工程, 2009 (1): 128 - 129.
- (CHENG Lu, XU Mo, MAO Bangyan. Evaluation of the influence of Chengdu metro line 2 on groundwater [J]. Subgrade engineering, 2009 (1): 128 - 129. )
- [ 13 ] 潘俊, 杜晓宇, 张宗禹. 地铁工程对地下水源热泵渗流场及温度场影响的实验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2018, 34 (4): 741 - 749.
- (PAN Jun, DU Xiaoyu, ZHANG Zongyu. Experiment of the influence of subway engineering on the seepage field and temperature field of groundwater source heat pump [J]. Journal of Shenyang jianzhu university: natural science edition, 2018, 34 (4): 741 - 749. )
- [ 14 ] PUJADES E, ANDER L, CARRERA J, et al. Barrier effect of underground structures on aquifers [J]. Engineering geology, 2012, 145 - 146.
- [ 15 ] 许焯霜. 考虑地下构筑物对地下水渗流阻挡效应的地面沉降性状研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- (XU Yeshuang. Evaluation of the behaviour of groundwater seepage and land subsidence via considering infrastructures penetrated into aquifers [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010. )
- [ 16 ] 王天慧, 潘俊. 沈阳城区地下水温度动态变化特征及对水源热泵的影响 [J]. 建筑节能, 2017, 45 (4): 38 - 40.
- (WANG Tianhui, PAN Jun. Characteristics of groundwater temperature dynamics in Shenyang urban area and its impact on water source heat pump [J]. Building energy conservation, 2017, 45 (4): 38 - 40. )
- [ 17 ] SINGH J B, FOSTER G, HUNT A W. Representative operating problems of commercial ground-source and groundwater - source heat pumps [G] ASHRAE Transactions, 2000, 106 (2): 561 - 568.
- [ 18 ] 宫辉力. 郑州市地下水渗流场的数值模拟和优化管理 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 1998 (6): 121 - 129.
- (GONG Huili. Numerical simulation and optimization management of groundwater seepage field in Zhengzhou city [J]. Journal of Peking university (natural science), 1998 (6): 121 - 129. )
- [ 19 ] RYBACH L, SANNER B. Ground-source heat pump systems the european experience [J]. Geo-heat center quarterly bulletin, 2000, 13 (3): 16 - 26.
- [ 20 ] 位菁, 赵鑫. 城市地下工程建设对地下水环境的影响及措施分析 [J]. 企业技术开发, 2015, 34 (15): 147 - 148.
- (WEI Jing, ZHAO Xin. Analysis of the influence of urban underground engineering construction on groundwater environment and measures [J]. Enterprise technology development, 2015, 34 (15): 147 - 148. )
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)